УДК 621.396.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ СИЛОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С УЧЕТОМ РАЗРЫВОВ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕНОСА

Г.В. Кузнецов, *А.В. Белозерцев

Томский политехнический университет*
Томский государственный университет
E-mail: belozertcev@ngd.gazprom.ru

Численно решена двумерная задача о нестационарном температурном поле в корпусе силового биполярного транзистора с восемью источниками тепловыделения общей мощностью 60 Вт. Исследовано влияние сеточных параметров на точность вычисления температур. Установлено, что при определенных сеточных параметрах возможно достижение очень высокой точности вычислений.

Введение

Выбор условий работы современных полупроводниковых приборов (ППП) в том числе транзисторов с большим энерговыделением во многом определяется тепловыми режимами их эксплуатации. Экспериментальная отработка оптимальных (хотя бы по отдельным критериям) тепловых режимов представляет очень сложную задачу в связи с малыми размерами ППП, малыми временами работы, высокими значениями рассеиваемой мощности и значительными скоростями роста и падения температур элементов ППП. Измерения температур на отдельных поверхностях таких элементов возможны только со значительными погрешностями из-за высокой инерционности как термопарных, так и оптических методов измерения. Оценка же уровня температур на закрытых границах между элементами (или внутри какого-либо элемента) практически невозможна потому, что ввод термопар в зону измерения существенно трансформирует поле температур в этой зоне и нарушает условия работы ППП.

В связи с этим оценки диапазонов изменения температур внутри полупроводникового прибора с приемлемой для проведения проектных и конструкторских работ точностью возможны только по результатам математического моделирования процессов переноса теплоты с учетом реальных механизмов теплообмена на всех границах [1, 2]. Известны результаты такого моделирования для приборов с относительно низкой рассеиваемой мощностью (ед. Вт) и достаточно большими характерными временами работы (сотни с) [3, 4]. Для ППП типа мощных транзисторов, работающих менее секунды, каких либо результатов численного моделирования до настоящего времени не опубликовано.

Целью данной работы является решение задачи о нестационарном температурном поле мощного транзистора в рамках двумерной модели теплопроводности для области с разрывными значениями теплопроводности, теплоемкости и плотности.

Постановка задачи

Анализ типичных конструктивно компоновочных решений по схемам мощных транзисторов показывает, что характерными для таких приборов являются сильные разрывы (в 100 и более раз) коэффициента теплопроводности на границах между конструктивными элементами. Значения теплоемкости и

плотности на границах также изменяются, но не более чем 6 раз. Эти особенности рассматриваемого типа задач ранее специально не исследовались. Поэтому нет отработанных алгоритмов их решения.

Рассматривался типичный вариант исполнения полупроводниковых приборов в корпусе ТО-220. За основу взят широко распространенный транзистор КТ819Г. Транзистор выполнен в металлопластиковом корпусе рис. 1, 2. Основой корпуса является медное основание (зона 1, 3) толщиной 1,22 мм, на котором припаян полупроводниковый кристалл (зона 4), пластик закрывает кристалл и часть медного основания (зона 2, 3, 4).

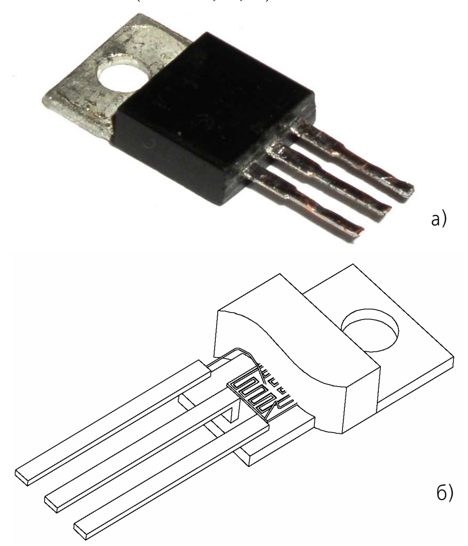


Рис. 1. *Общий вид транзистора КТ819Г в корпусе ТО-220: а) фотография; б) схема*

В кристалле находятся 8 транзисторов. Электроды соединены параллельно на поверхности кристалла медным напылением толщиной 15 мкм. Транзистор имеет тепловой контакт с радиатором.

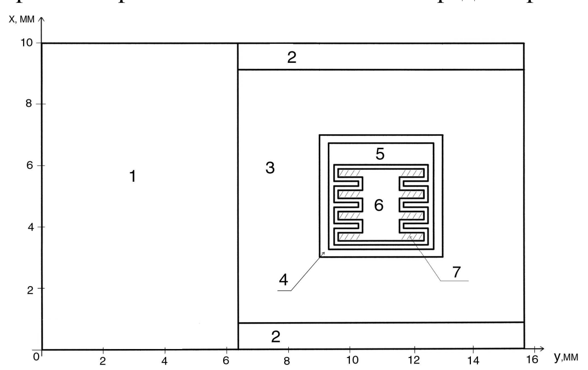


Рис. 2. *Схема области решения; 1) медное основание, 2) пластик, 3) пластик на медном основании, 4) кристалл на медном основании в пластике, 5) базовое медное напыление на кристалле, 6) эмиттерное медное напыление на кристалле, 7) заштрихованные области восьми источников тепловыделения*

При постановке задачи приняты следующие допущения:

1. В медном основании (зона 1) не учитывается наличие крепежного отверстия. Численный эксперимент показывает, что градиент температуры в этой зоне мал, поэтому отсутствие отверстия в этой зоне слабо влияет на распределение температур.
2. Не учитываются выводы транзистора. Поскольку выводы вплавлены в пластик с низкой теплопроводностью, а к кристаллу припаяны тонкими проводниками, выводы не имеют хорошего теплового контакта с областью интенсивного тепловыделения.
3. Интенсивность источника тепловыделения не зависит от координаты.
4. Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи не зависят от температуры.
5. Температура радиатора постоянна и равна температуре внешней среды.

Численный анализ температурных полей проводился при теплофизических характеристиках, приведенных в табл. 1.

Таблица 1. *Теплофизические характеристики материалов*

Материал	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м^3	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Медь	390	8930	365
Компаунд	2000	1500	0,8
Кремний	712	2300	159

Поскольку толщина элементов прибора зависит от координат x и y, а задача решена в двумерной постановке, то все размеры по высоте приведены к одной величине. Вследствие этого изменятся эквивалентные теплофизические характеристики некоторых областей. В данном случае все вертикальные размеры приведены к толщине медного основания d_0=1,22 мм. С учетом такого усреднения значения теплофизических характеристик определяются из выражений (1–3):

$$\lambda_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i \cdot d_i}{d_0}, \qquad (1)$$

где λ_i, d_i – коэффициент теплопроводности и толщина i-ого слоя вертикальной структуры соответственно, λ_0 – эквивалентный коэффициент теплопроводности всех слоев N, приведенный к толщине d_0.

$$\rho_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} \rho_i \cdot d_i}{d_0}, \qquad (2)$$

где ρ_i – плотность i-ого слоя вертикальной структуры, ρ_0 – эквивалентная плотность всех слоев N, приведенная к толщине d_0.

$$c_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} c_i \cdot \rho_i \cdot d_i}{d_0 \cdot \rho_0}, \qquad (3)$$

где c_i – удельная теплоемкость i-ого слоя вертикальной структуры, c_0 – эквивалентная удельная теплоемкость всех N слоев, приведенная к толщине d_0.

Коэффициенты конвективной теплоотдачи на границах $x=0$; $x=L_x$; $y=0$; $y=L_y$ приняты равными $\alpha_2 = 2\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$. Коэффициент теплопередачи через поверхность контакта с радиатором, принят равным $\alpha_1 = 80\ \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$, что соответствует толщине теплопроводной пасты 10 мкм и ее удельной теплопроводности $0{,}8\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$.

Математическая модель

В такой постановке задача сводится к решению нестационарного уравнения теплопроводности (4) с соответствующими граничными (6–9) и начальными (5) условиями:

$$C(x,y)\cdot\rho(x,y)\cdot\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda(x,y)\cdot\frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda(x,y)\cdot\frac{\partial T}{\partial y}) + Q(x,y) + \frac{\alpha_1\cdot(T_v - T)}{d_0}, \quad (4)$$

где T – температура, $C(x,y)$ – удельная теплоемкость, $\rho(x,y)$ – плотность, $\lambda(x,y)$ – теплопроводность, $Q(x,y)$ – интенсивность тепловыделения, d – приведенная толщина прибора.

$$0\le t\le\infty,\ 0\le x\le L_x,\ 0\le y\le L_y,$$

где L_x, L_y – максимальные линейные размеры.

$$t=0;\quad T=T_0(x,y); \quad (5)$$

$$x=0;\quad -\lambda\cdot\frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2\cdot(T_v - T); \quad (6)$$

$$x=L_x;\quad \lambda\cdot\frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2\cdot(T_v - T); \quad (7)$$

$$y=0;\quad -\lambda\cdot\frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_2\cdot(T_v - T); \quad (8)$$

$$y=L_y;\quad \lambda\cdot\frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_2\cdot(T_v - T). \quad (9)$$

Задача решена методом конечных разностей, разностные аналоги уравнения решены методом прогонки [2].

Результаты численного исследования

Численный анализ выполнен при суммарной интенсивности тепловыделения 60 Вт, равномерно распределенной по всем восьми локальным источникам.

Численное моделирование велось на неравномерной сетке. Шаг сетки по координатам x и y изменялся от некоторого минимального значения $h_{\min}$ в геометрической прогрессии с коэффициентом 1,3. Шаг сетки по координатам увеличивался от внешней границы элемента до середины области решения и затем уменьшался к противоположной границе элемента. Таким образом, сетка сгущалась на границах между элементами. Численные исследования велись в диапазоне изменения времени до 3 с. Начальная температура принималась равной температуре окружающей среды 300 К. Шаг по времени составлял от 0,1 до 12,8 мкс. Минимальный шаг по координате $h_{\min}$ варьировался от 1 до 45 мкм.

Типичное распределение температурного поля при $t=3$ с, минимальном шаге по координате $h_{\min}=32$ мкм и шаге по времени $\tau=2\cdot10^{-6}$ с приведено на рис. 3.

Хорошо видны максимумы температур, соответствующие зонам интенсивного тепловыделения транзистора. Максимальные перепады температур достигают в отдельных сечениях 23 К. Соответственно отклонение от средних значений составляет $\pm11{,}5$ К. Анализ температурного поля, приведенного на рис. 3, показывает, что оно в целом хорошо соответствует условиям тепловыделения и теплопереноса в рассматриваемой структуре. При этом необходимо учитывать, что рамки двумерной модели несколько ограничивают возможности

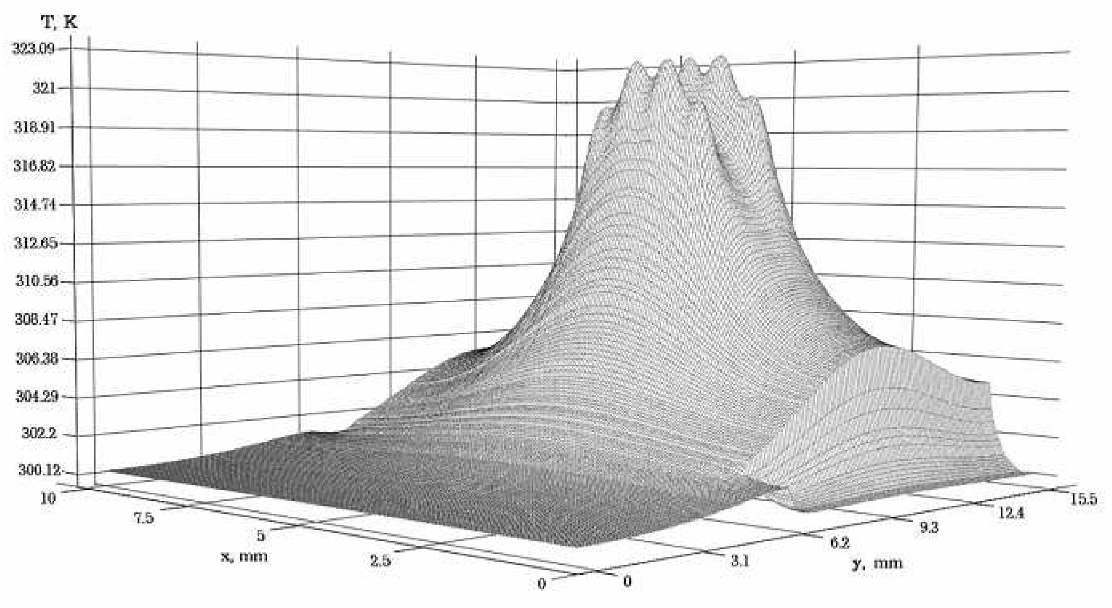


Рис. 3. *Распределение температур на 3-й секунде работы ППП (транзистора)*

численного анализа. Если ориентироваться на результаты [3, 4], то можно предположить, что переход к пространственной модели теплопереноса в силовом транзисторе может позволить уточнить полученные результаты. Но характер установленных закономерностей при этом не изменится.

Решение же пространственной задачи теплопереноса для рассматриваемого объекта исследования возможно только на сетке, параметры которой выбраны, если и не оптимальными, то по крайне мере наиболее рациональными и обоснованными из всего многообразия возможных комбинаций сеточных параметров. До настоящего времени теоретически обоснованные рекомендации по практической реализации такого выбора для областей с сильными разрывами коэффициентов переноса отсутствуют. По крайней мере, для исследуемых в данной работе объектов. Поэтому специально решалась задача выбора сеточных параметров, обеспечивающих максимально возможную точность вычислений температур с учетом особенностей рассматриваемой модели теплопереноса. В связи с отсутствием экспериментальных данных и невозможностью их получения в реальных условиях, оценка достоверности полученных в ходе вычислительных экспериментов результатов по температурным полям силового транзистора проводилась на основании анализа точности выполнения закона сохранения энергии. При реализации каждого варианта численного решения задачи рассчитывалась погрешность баланса энергии в области решения. Также контролировались максимальные отклонения температур и средние отклонения температур от поля температур варианта с самым мелким шагом. Погрешность по балансу энергии определялась по формуле

$$\varepsilon = \frac{\left|A - (U_1 + U_2 + U_3)\right|}{A} \cdot 100\ \%;$$

$$U_1 = \sum_{n=1}^{N} \sum_{x=1}^{Mx} \sum_{y=1}^{My} \alpha_1 \cdot (T_{x,y}^n - T_v) \cdot h_{x_x} \cdot h_{y_y} \cdot \tau,$$

где U_1 – тепло, отведенное от корпуса прибора через нижнюю поверхность за время $N{\cdot}\tau$, M_x и M_y – число узлов координатной сетки по x и y соответственно, N – число шагов по времени.

$$U_2 = \sum_{n=1}^{N} \sum_{x=1}^{Mx} \alpha_2 \cdot \left[T_{x,1}^n + T_{x,My}^n - 2 \cdot T_v \right] \cdot h_{x_x} \cdot \tau +$$

$$+ \sum_{n=1}^{N} \sum_{y=1}^{My} \alpha_2 \cdot \left[T_{1,y}^n + T_{Mx,y}^n - 2 \cdot T_v \right] \cdot h_{y_y} \cdot \tau,$$

где U_2 – тепло, отведенное от корпуса прибора через боковые поверхности за время $N{\cdot}\tau$.

$$U_3 = \sum_{x=1}^{Mx} \sum_{y=1}^{My} c_{x,y} \cdot \rho_{x,y} \cdot (T_{x,y} - T_v) \cdot d \cdot h_{x_x} \cdot h_{y_y},$$

где U_3 – тепло, накопленное внутри прибора за счет теплоемкости.

$$A = \sum_{x=1}^{Mx} \sum_{y=1}^{My} Q_{x,y} \cdot d \cdot h_{x_x} \cdot h_{y_y} \cdot N \cdot \tau,$$

где A – суммарное тепловыделение всех 8-ми источников.

$$\Delta T_{\max} = \max(T_{1x,y} - T_{2x,y}), \qquad (10)$$

где, x=1...M_x, y=1...M_y.

$$\Delta\overline{T} = \frac{\sum_{x=1}^{Mx} \sum_{y=1}^{My} \left| T_{1x,y} - T_{2x,y} \right|}{M_x \cdot M_y}. \qquad (11)$$

При варьировании шага по времени определялась погрешность по балансу энергии, максимальное отличие температуры по (10) и среднее отличие температуры по (11) от случая с самым мелким шагом по времени τ=2·10^{-6} с. В табл. 2 приведены результаты вычисления погрешности расчетов при различных шагах по времени при $h_{\min}$=32 мкм, M_x=136, M_y=156. Варианты сравнивались с базовым вариантом при по максимальным (10) и средним (11) отличиям температур.

Таблица 2. *Зависимость погрешности вычисления баланса энергии и отклонения температур от шага по времени*

τ, мс	E, 10^{-3} %	$T_{\max}$, K	$\overline{T}$, 10^{-3} K
0,002	0,048	0	0
0,1	2,386	0,052	2,054
0,2	4,781	0,102	4,495
0,4	9,574	0,219	9,035
0,8	19,17	0,452	18,115
1,6	38,37	0,919	36,275
3,2	76,82	1.853	72,585
6,4	153,9	3,721	144,72
12,8	308,8	7,465	290,52

Хорошо видно, что уменьшение шага по времени ведет к снижению погрешности по балансу энергии в системе. Причем приемлемые результаты получаются только при значениях τ в десятые доли мс. При этом отклонения $\Delta T_{\max}$ могут составлять всего менее 0,1 K, при погрешности ε соответственно 0,003...0,004 %. Полученные результаты показывают, что даже при разрывных теплофизических характеристиках с большими отклонениями λ на границах между элементами транзистора может быть достигнута приемлемая точность вычислений за счет использования очень мелких шагов по времени.

Таблица 3. *Зависимость погрешности вычисления баланса энергии от минимального шага по пространственной координате при τ=0,4 мс*

$h_{\min}$, мкм	M_x	M_y	E, 10^{-3} %
1	460	652	9,622
2	380	536	9,628
4	316	422	9,614
8	252	324	9,613
16	188	288	9,597
32	136	156	9,574
45	116	116	9,577

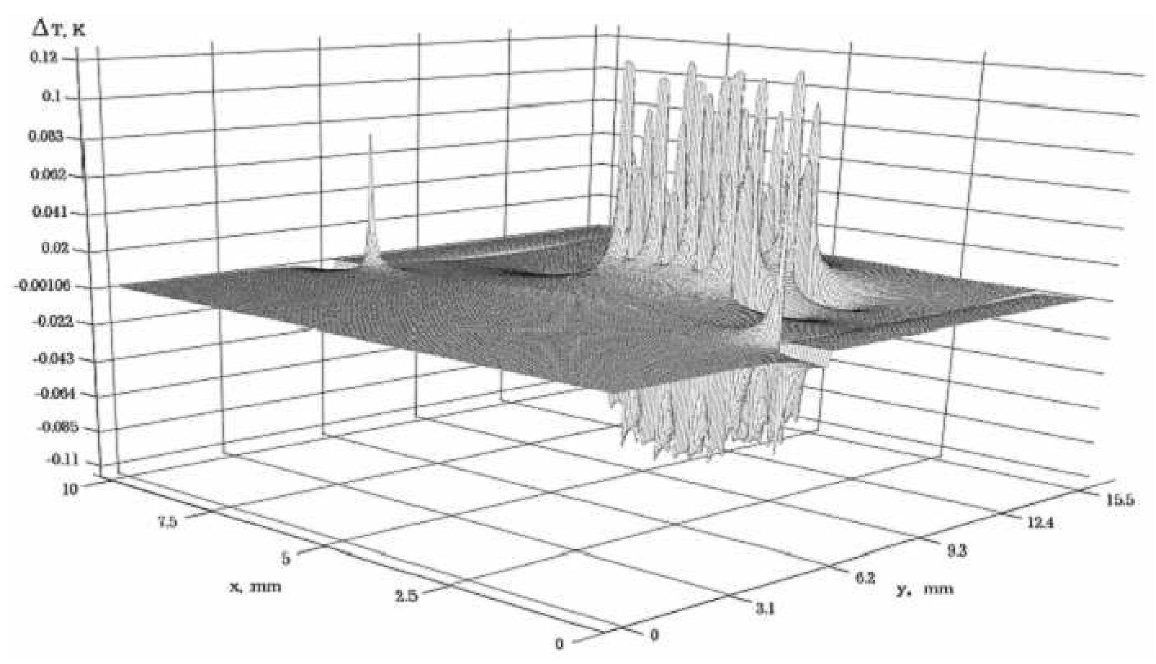


Рис. 4. *Распределение разности температур при изменении шага по времени от 0,2 до 0,4 мс*

На рис. 4 приведены разности температур T_3 двух вариантов расчетов (при шаге по времени 0,4 и 0,2 мс) по формуле

$$T_{3x,y} = T_{2x,y} - T_{1x,y}.$$

Видно, что эти разности не превышают 0,12 K. Но также видно, что максимальные отклонения достигаются в зонах наибольших тепловыделений, расположенных вблизи границ между элементами.

В табл. 3 приведены результаты вычисления погрешности баланса энергии в зависимости от минимального шага сетки по координатам, при шаге по времени τ=0,4 мс. При варьировании минимального шага по координате погрешность определялась только по балансу энергии, поскольку в каждом случае узлы неравномерной сетки имели несовпадающие координаты.

Выводы

Результаты численного эксперимента показывают, что погрешность численного решения линейно связана с шагом по времени и слабо зависит от шага по координате. Наибольшая погрешность возникает на границах неоднородностей с большими перепадами коэффициентов теплопроводности, и на границах источников тепловыделения. Для погрешности менее 0,5 K и ошибки по балансу энергии не более 0,02 % достаточно шага по времени 0,8 мс и шага по координате 32 мкм. Полученный результат создает объективные предпосылки к исследованию пространственных температурных полей в полупроводниковых приборах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. — М.: Высшая школа, 1984. — 247 с.
2. Самарский А.А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1977. — 656 с.
3. Алексеев В.П., Кузнецов Г.В., Шлома С.В. Расчет температурного поля печатной платы с учетом конвективного и радиационного теплообмена на поверхности платы // Инженерно-физический журнал. — 2002. — Т. 75. — № 5. — С. 177—179.
4. Alekseev V.P., Kuznetsov G.V., Shloma S.V. Forecasting the reliability of radio components by three-dimensional thermophysical modeling // Journal of Engineering Thermophysics. — 2002. — V. 11. — № 4. — P. 311—320.